

Дослідження руху молольних тіл і пульпи в барабані кульового млина з метою ідентифікації завантаження

У статті приведені результати дослідження руху молольних тіл в поперечному перерізі й вздовж барабана. Виокремлена закономірність розташування та руху куль у поперечних перерізах, встановлені перемішуючі властивості кульового млина.

кульовий млин, рух молольних тіл, розташування куль, підстеляючий шар, перемішування пульпи

На рудозбагачувальних фабриках для подрібнення руди класів 0...25 мм використовують кульові млини, які відрізняються великою енергоємністю, витратами молольних тіл і футеровки. Відсутність засобів ідентифікації завантаження рудою даних технологічних агрегатів приводить до їх недовантаження і, як наслідок, перевитрати електричної енергії, куль і футеровки. Це не дозволяє здійснити передбачений законодавством України напрям реалізації ресурсозберігаючих технологій в промисловості. Враховуючи, що задача ідентифікації завантаження кульових млинів рудою не розв'язана, тема статті є актуальною.

Даний науковий напрям розробляє ряд зарубіжних і вітчизняних вчених. В Україні ці дослідження здійснюють в різні роки А.Г. Астахов, М.В. Федорівський, В.О. Бунько, О.М. Марюта, Ю.Г. Качан, Є.В.Кочура, А.С. Давидкович та ін. Звукометричні засоби ідентифікації завантаження кульових млинів рудою отримали найбільше розповсюдження, однак вони не забезпечують достатньої точності визначення технологічного параметра. На дані засоби чи пристрої іншого типу сильний вплив здійснюють молольні тіла і пульпа, що знаходяться у його барабані, однак їх рух системно ніхто не вивчав.

Метою даної роботи є системне дослідження руху молольних тіл і пульпи в барабані кульового млина, що подрібнює вихідну руду збагачувальної фабрики.

Об'єм пульпи у барабані млина суттєво впливає на його продуктивність. Застосування кульового млина нового типу – з низьким рівнем зливу пульпи дозволяє позбавитись від недоліків традиційних технологічних агрегатів. Нові кульові млини, крім того, мають ще ряд переваг над існуючими пристроями для подрібнення руди [1]. В даних млинах об'єм пульпи, що знаходиться у барабані, оптимізований і при роботі зберігається незмінним. Він забезпечує покриття підстеляючого шару куль по всій довжині барабана [1]. Тому дослідження слід спрямовувати на використання нового типу кульових млинів.

У збагачувальній галузі в основному використовують водопадний режим роботи кульових млинів. У водопадному режимі після піднімання куль і руди на певну висоту вони відриваються від поверхні барабана і далі рухаються у вільному польоті по параболічним траєкторіям. Подрібнення здійснюється в основному ударом і частково перетиранням і роздушуванням. Кулі зовнішнього шару, притиснутому до футеровки, при відриві рухаються по параболічній траєкторії і переходять у коловий рух після удару по внутрішній стінці барабана. Швидкість руху кулі перед ударом з врахуванням

отриманої в [2] залежності і значень лінійної швидкості при обертовому русі, колової частоти обертання, швидкості обертання та кута відриву куль можна виразити залежністю

$$v = 2\pi\psi n_{кр} R \sqrt{1 + 8 \sin^2(\arccos \psi^2)}, \quad (1)$$

де ψ – частка швидкості обертання барабана кульового млина від критичної $n_{кр}$;

R – внутрішній радіус барабана млина.

В залежності (1) параметри $n_{кр}$ і ψ є незмінними, а внутрішній радіус барабана млина змінюється в наслідок зносу футеровки. Тому швидкість куль зовнішнього шару в момент удару по футеровці млина у водоспадному режимі роботи кульового млина в процесі експлуатації не є постійною величиною.

У водоспадному режимі роботи кульового млина в наслідок руху куль по параболічній траєкторії число повних циклів руху молотильного тіла перевищує кількість обертів барабана технологічного агрегата за певний відрізок часу. Таке підвищення оцінюють числом циклів кулі за час одного оберту барабана млина, яке визначають за залежністю [2]

$$Ц = \frac{t_{\pi}}{T} = \frac{\pi}{(\pi - 2\alpha) + \sin 2\alpha}, \quad (2)$$

де t_{π} – час одного оберту барабана млина;

T – час одного циклу руху кулі;

α – кут відриву кулі від поверхні футеровки.

Як видно з (2), число циклів кулі залежить від кута відриву α . Показник не однаковий для різних шарів куль при незмінній швидкості обертання барабана млина. Для куль певного шару показник змінюється при зміні швидкості обертання барабана млина. Враховуючи, що $\cos \alpha = \psi^2$, швидкість обертання барабана $n = \psi n_{кр}$, а критична швидкість обертання барабана млина залежить від його внутрішнього діаметра, то число циклів кулі буде дещо змінюватися при зносі футеровки.

Прийняті Е.В. Девісом допущення і створена ним теорія роботи кульових млинів здебільшого стосуються водоспадного режиму і достатньо добре описують процеси в технологічному агрегаті. В подальших дослідженнях було встановлено, що куля, яка відірвалася від футеровки, рухається по ланцюговій лінії. Однак математичний апарат для визначення кінематичних і динамічних параметрів кульового млина з врахуванням внесених уточнень виявився настільки складним, що при практичному використанні доцільно було спростити висновки, замінивши ділянку ланцюгової лінії параболою і звівши задачу до класичної теорії кульового млина. В той же час Н.П. Неронов встановив [3], що теоретично зовнішній шар куль може переходити на траєкторії, які відповідають чисто водоспадному режиму, при швидкості обертання, більшій або рівній 84% від критичної. Частоти обертання кульових млинів у промислових умовах складають в основному 68...82% від критичної. Це вказує на те, що двофазний цикл руху куль по класичній теорії Девіса практично нездійснений на практиці. Нереальність двофазного циклу руху куль у млинах при режимах роботи промислових агрегатів показана і в роботі [4].

Експериментальними дослідженнями, які проводилися поряд з теоретичними, встановлено, що розподіл кульового завантаження в кульовому млині дійсно відрізняється від запропонованого класичною теорією [5]. Встановлено, що при параметрах механічних режимів, які використовують у промисловості, характерним є

наявність зони п'яти, де відбувається інтенсивне подрібнення розтиранням і ударом, а також знос молоткових тіл та футеровки. Крім того, у поперечному перерізі барабана створюється малорухоме ядро, навколо якого по замкнутим траєкторіям циркулюють останні кулі. Дослідженнями, проведеними на початку нового століття [6], підтверджено, що при роботі кульових млинів в режимах наближених до промислових умов, двофазний цикл руху куль не реалізується. На практиці контур зовнішнього шару кульового завантаження є трифазним. Рух куль зовнішнього шару можна подати наступними трьома складовими: підняття по коловим траєкторіям; рух по параболічним траєкторіям; відкочування по п'яті до футеровки. Кулі рухаються по замкнутим траєкторіям. Отже, режим роботи більшості кульових млинів у промислових умовах відповідає змішаному. При цьому режимі контакт зовнішнього шару куль з футеровкою відбувається в зоні п'яти.

Більш детально рух куль зовнішнього шару при змішаному режимі роботи кульового млина можна простежити по рис. 1.

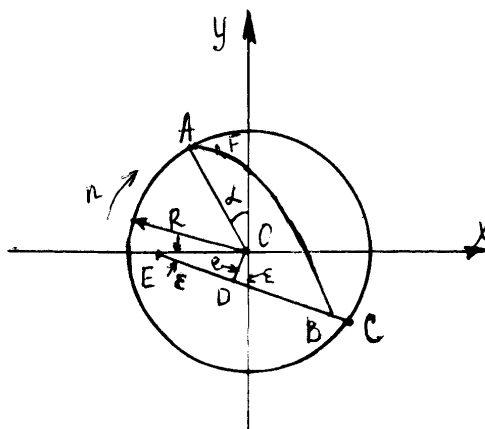


Рисунок 1 - Контур зовнішнього шару завантаження при змішаному режимі роботи кульового млина

Кулі з точки С до точки А рухаються по коловій траєкторії, а з точки А до точки В, яка знаходиться на зовнішній поверхні п'яти – по параболі. Далі куля рухається по прямій ВС до футеровки. Пряма ЕС описується рівнянням [6].

$$y = -\frac{e}{\cos \varepsilon} - (x - R \sin \alpha) \operatorname{tg} \varepsilon - R \cos \alpha. \quad (3)$$

Отже, перед ударом по футеровці куля зовнішнього шару рухається по нахилений прямій на відстані, що дорівнює довжині відрізка ВС, зі швидкістю v_k . При підвищених частотах обертання барабана кулі зовнішнього шару можуть перейти на траєкторії двофазного циклу. Тоді швидкість руху куль буде максимальною і визначиться за залежністю (1), оскільки молоткові тіла наносять удари по футеровці з параболічних траєкторій.

При падінні куль на п'яту відбувається їх гальмування, далі молоткові тіла пересуваються по зовнішньому контуру п'яти (прямій ВС) зі швидкістю значно меншою, ніж при русі по параболічній траєкторії. З переходом зовнішнього шару завантаження в режим, що відповідає двофазному циклу, швидкість руху куль стрімко зростає, оскільки гальмування на будь-яких ділянках траєкторії падіння молоткових тіл відсутнє аж до удару по футеровці. Однак, навіть при переміщенні куль по поверхні п'яти, при ударі по футеровці буде відбуватися ефективне руйнування частинок руди, зважаючи на те, що молоткові тіла діють на зерна подрібнюваного матеріалу з зусиллям,

яке у кілька разів перевищує оптимальне значення, обумовлене їх міцністними характеристиками [7].

У трифазному режимі руху завантаження величина ексцентриситету e абсолютної траєкторії куль зовнішнього контура п'яти, а також величина швидкості молоткових тіл залежить не лише від параметрів механічного режиму, але і від типу футерувальних плит. На швидкість руху куль по нахиленій поверхні, крім того, будуть впливати рівень пульпи над поверхнею п'яти, співвідношення твердого до рідкого, крупність матеріалу та інші фактори. Однак, з розглянутого витікає, що, не дивлячись на те, що швидкість руху куль зовнішнього шару при ударі по футеровці змінюється під впливом значної кількості факторів, у певних умовах роботи кульового млина ця величина буде незмінною. Як стверджує С.Ф. Шинкоренко [1], зниження швидкості падіння куль у пульпі також практично не зменшує оборотність кульового завантаження, що дозволяє застосовувати для таких умов залежність (2).

У кульових млинах, що обертаються з порівняно великою швидкістю, спостерігається чітко виражене розшарування молоткових тіл у поперечних перерізах барабана. Дрібні кулі за цих умов виходять на зовнішні ряди і, досягнувши футеровки, як би покривають її шаром, припиняючи доступ крупним молотковим тілам. При цьому крупні кулі зосереджуються всередині завантаження. Розшарування куль по колу пояснюється тим, що центр маси малого молоткового тіла може бути ближче до барабана млина, ніж центр маси великої кулі. В наслідок цього радіус обертання малих куль більший, а це означає, що більша і швидкість порівняно з крупними тілами. Таким чином, мала куля при обертанні барабана при наступних обертах піднімається вище і виявляється у зовнішньому шарі кульового завантаження. Більша ж куля має меншу швидкість, піднімається на меншу висоту і, відриваючись від футеровки, залишається в одному з внутрішніх шарів. В результаті великі кулі залишаються в середній частині завантаження і не змішуються з малими кулями у всій масі завантаження [8].

Як було показано раніше, в кульових млинах у певних перерізах зосереджуються кулі наближено однакових розмірів [9]. При дозавантаженні крупні кулі поступово переміщуються до розвантажувальної горловини млина. Зважаючи на ефект розшарування куль у окремому поперечному перерізі, можна стверджувати, що у зовнішньому шарі кульового завантаження будуть більш дрібні молоткові тіла із наявного неширокого діапазону зміни їх розміру. Тобто, в конкретному поперечному перерізі барабана у зовнішньому шарі будуть зосереджені кулі практично одного розміру. При переміщенні крупних куль вздовж барабана вони не будуть потрапляти до зовнішнього шару.

Кульове завантаження у барабані млина взаємодіє з пульпою і крупними частинками руди. У динаміці сумарний об'єм пульпи, який знаходиться у барабані, складається з об'єму зони затоплення його нижньої частини з рівнем, що дорівнює рівню зливу млина, і об'єму пульпи, піднятої разом з кульовим завантаженням. Наприклад, для млинів з центральним розвантаженням при коефіцієнті заповнення об'єму кульовим завантаженням 0,4 і частотою обертання 0,8 від критичної злив млина над нижньою точкою барабана складає 0,38 його внутрішнього діаметра D [1]. Середня висота шару зливу пульпи у горловині млина складає 10 см. При цьому виділяють глибину занурення кулі зовнішнього шару в пульпу при падінні. Цей показник найкращий у кульових млинів нового типу з низьким рівнем зливу, де об'єм пульпи у барабані оптимізований і зберігається незмінним та забезпечує покриття шару підстелених куль по всій довжині технологічного агрегату.

Як встановив С.Ф. Шинкоренко, висота підстеляючого шару при звичайних режимах роботи в середньому складає $0,1 \dots 0,2D$ млина, а діаметр горловини при цьому повинен знаходитись в межах $0,6 \dots 0,8D$ [10]. Аналіз даних залежностей показує, що в

указаних межах зміни конструктивного і технологічного параметра необхідно найкращі співвідношення підбирати для кожного діаметра млина. Тоді в процесі експлуатації об'єм пульпи у барабані буде залишатись практично оптимальним. Наприклад, для млина з $D = 5,5$ м можна прийняти товщину шару куль $0,18D$, а діаметр горловини $0,6 D$. Тоді при незношеній футеровці товщиною 150 мм і рівні зливу 100 мм підстеляючий шар куль буде покривати шар пульпи 6 см. При спрацюванні футеровки без додаткового довантаження куль товщина покриваючого шару пульпи буде збільшуватися наближено до 16 см, що суттєво не буде впливати на роботу куль. З розглянутого видно, що умови руху куль змінюються і в наслідок зростання рівня пульпи, що знаходиться над підстеляючим шаром молотьних тіл, однак в конкретних технологічних ситуаціях вони залишаються постійними.

Подрібнювальна система неперервної дії в усталеному режимі роботи характеризується незмінністю подачі та видалення матеріалу, причому гранулометричний склад матеріалу в млині також залишається незмінним. Кульовий млин можливо розглядати як змішувач, в якому відбувається руйнування частинок. Якщо млин розглядати як ідеальний змішувач, то гранулометричний склад його продукту повинен співпадати з гранулометричним складом матеріалу, що знаходиться в будь-якій точці технологічного агрегату. Подрібнюючий агрегат можна розглядати як такий, що складається з ряду поперечних ділянок, в кожній з яких міститься однакова кількість матеріалу [11]. При такому поданні матеріал, що міститься в кінцевій ділянці, виявляється еквівалентним за складом продукту млина. На протязі однієї стадії перемішування певна частина матеріалу кожної ділянки буде пересуватися до розвантажувального кінця млина, інша – залишатися в межах тієї ж ділянки, а остання – переміщатися до завантажувального кінця в наслідок зворотного перемішування [11]. Закономірності переносу матеріалу на кожній ділянці будуть аналогічними. Однак при цьому існує загальний рух матеріалу за напрямом до розвантажувального кінця. Якщо матеріал з'явився на ділянці продукту млина, то це означає, що він вийшов з системи і не може бути підданий зворотному перемішуванню. Таке перемішування матеріалу відбувається в основному за рахунок повздовжнього руху пульпи, викликаного різницею в рівнях завантаження і розвантаження та динамічного тиску потоку, що падає на її поверхню.

Додаткове перемішування пульпи здійснюється при обертанні барабана, оскільки її частина захоплюється кулями і транспортується на верхню відмітку. При цьому створюється спадний потік матеріалу, який повертається разом з падаючими кулями у вихідний об'єм пульпи, здійснюючи таким чином її замкнутий рух. Такий рух приводить до того, що частина пульпи переміщується по спіралеподібній кривій до розвантажувального кінця. Інтенсивне перемішування пульпи у кульовому млині разом з подрібненням твердого приводить до ефективного осереднення вмісту різних частинок руд в одиницях об'єму матеріалу не в розвантаженні технологічного агрегату, а значно раніше – на початкових ділянках руху складної суміші від завантажувальної горловини.

Густина пульпи в розвантаженні млина зв'язана з густиною пульпи в його барабані через імовірнісний коефіцієнт R_{II} [12], який знаходиться в межах $0 \dots 1$. Перше граничне теоретичне значення $R_{II} = 0$ відповідає повному розшаруванню твердої та рідкої фаз пульпи перед розвантаженням, а друге $R_{II} = 1$ – ідеальному перемішуванню.

Густину пульпи в барабані млина можливо визначити виразом [12]

$$\gamma_{\delta} = \frac{Q_{\text{вхТ}} \delta_T T_T}{Q_{\text{вхТ}} T_T + Q_{\text{вхВ}} T_B}, \quad (4)$$

де δ_T – густина твердого;

$Q_{\text{вхТ}}$, $Q_{\text{вхВ}}$ – відповідно об'ємна витрата твердого та води, що подається у млин;

T_T, T_B – час перебування відповідно твердої фази та води в барабані млина.
Густину пульпи у розвантаженні млина можна визначити виразом

$$\gamma_{\text{вих}} = \frac{Q_{\text{вих}T} \delta_T}{Q_{\text{вих}T} + Q_{\text{вих}B}}, \quad (5)$$

де $Q_{\text{вих}T}, Q_{\text{вих}B}$ – відповідно об'ємна витрата твердого та води, з кульового млина.

Оскільки в усталеному режимі роботи млина $Q_{\text{вих}T} = Q_{\text{вх}T}, Q_{\text{вих}B} = Q_{\text{вх}B}$, то густину пульпи на виході технологічного агрегату можна подати залежністю

$$\gamma_{\text{вих}} = \frac{Q_{\text{вх}T}}{Q_{\text{вх}T} + Q_{\text{вх}B}}. \quad (6)$$

Значення імовірнісного коефіцієнта

$$R_{\Pi} = \frac{\gamma_{\text{вих}}}{\gamma_{\delta}} = \frac{Q_{\text{вх}T} T_T + Q_{\text{вх}B} T_B}{(Q_{\text{вх}T} + Q_{\text{вх}B}) T_T}. \quad (7)$$

З залежності (7) слідує, що при $T_T \neq T_B$ млин володіє деякими класифікуючими властивостями. При цьому виконується нерівність $0 < R_{\Pi} < 1$. Це може відбуватися при малих густинах пульпи та невеликій швидкості обертання барабана. Якщо $T_T = T_B$, млин веде себе як ефективний перемішувач [13]. При цьому $R_{\Pi} = 1$. Це може відбуватися при значних густинах пульпи [12]. Оскільки залежність вмісту класу – 0,071 мм у зливі млина від вмісту твердого в пульпі має максимум при співвідношенні тверде/рідке 81...82% [14], то у виробничих умовах кульові млини експлуатують при високих вмістах твердого, що робить пульпу достатньо в'язкою. Отже, кульовий млин є ідеальним перемішувачем. В ньому матеріал добре осереднений і пульпа має рівномірно розподілені частинки твердого різних розмірів у її об'ємі.

Таким чином, у кожному поперчному перерізі млина молольні тіла наближено однакового розміру розшаровуються і у зовнішньому шарі розшаровуються найбільш дрібніші кулі практично однакового розміру. Кулі більших діаметрів, що рухаються від завантажувальної до розвантажувальної горловини млина у зовнішній шар не потрапляють. Молольні тіла у кульових млинах у зовнішньому шарі рухаються по трифазним траєкторіям – колу, параболі та прямій до стінки барабана. При переміщенні куль по прямій на поверхні п'яти при ударі по футеровці буде відчуватися ефективне руйнування частинок руди, зважаючи на те, що молольні тіла діють на зерна подрібнюваного матеріалу з зусиллям, яке у кілька разів перевищує оптимальне значення, обумовлене їх міцнісними характеристиками. Не дивлячись на те, що швидкість руху куль зовнішнього шару при ударі по футеровці змінюється під впливом значної кількості факторів, у певних умовах роботи кульового млина ця величина буде незмінною. Пульпа при обертанні барабана здійснює складні рухи, осереднюючи склад. Кульовий млин ідеально осереднює матеріал і пульпа має рівномірно розподілені частинки твердого різних розмірів у її об'ємі.

На підставі проведених досліджень відкривається перспектива вивчення умов концентрування крупних фракцій руди у пульпі на вході кульового млина та вздовж його барабана.

Список літератури

1. Шинкоренко С.Ф. Гидромеханика рабочей среды шаровых мельниц мокрого измельчения / С.Ф. Шинкоренко // Горный журнал. – 2002. – №7. – С.19 – 24.
2. Андреев С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / Андреев С.Е., Зверевич В.В., Перов В.А. – М.: Недра, 1966. – 396 с.
3. Неронов Н.П. О новой теории шаровой мельницы и некоторых её приложениях // Известия АН СССР: (Отделение технических наук): статьи. / Н.П. Неронов – 1949. – С. 1061 – 1067.
4. Олевский В.А. О формуле Дэвиса для определения полезной мощности шаровой мельницы (по поводу статьи В.И. Златкина «Об одной, общей для барабанных мельниц, закономерности») / В.А. Олевский // Обогащение руд. – 1978. - №5. – С. 16 – 22.
5. Дун И.Ф. Влияние профиля футеровки барабана на процесс измельчения и износа в шаровой мельнице / И.Ф. Дун, В.А. Цукерман // Обогащение руд. – 1974. - №3. – С. 30 – 35.
6. Маляров П.В. Основы интенсификации процессов рудоподготовки: [монография] / Маляров П.В. – Ростов-на-Дону: ООО «Ростиздат», 2004. – 320 с.
7. Воробьев Н.Д. Моделирование процесса измельчения в шаровых мельницах / Н.Д. Воробьев // Горный журнал. – 2004. - №5. – С. 65 – 68.
8. Дешко Ю.И. Измельчение материалов в цементной промышленности / Дешко Ю.И., Креймер М.Б., Крыхтин Г.С. – М.: Изд. лит. по строительству, 1966. – 272 с.
9. Кондратець В.О. Теоретичне дослідження усталених і перехідних режимів роботи куль та футеровки в млинах / В.О. Кондратець, О.М. Рева, М.О. Карчевська // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеve машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць КНТУ. – 2008. - №21. – С. 187 – 196.
10. Шинкоренко С.Ф. Технология измельчения руд черных металлов / Шинкоренко С.Ф. – М.: Недра, 1982. – 212 с.
11. Линч А.Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление / Линч А.Дж.: пер. с англ. А.Р. Аксельрода, И.Ш. Зайденберга, Г.С. Мансурова: под ред. И.Ш. Зайденберга – М.: Недра, 1981. – 343 с.
12. Прокофьев Е.Ф. Упрощенная модель процесса мокрого измельчения в мельницах непрерывного действия // Вопросы автоматического управления процессами обогащения: (труды Свердловского горного института им. В.В. Вахрушева): статьи / Е.Ф. Прокофьев, А.Е. Троп, В.М. Аршинский. – Свердловск: Изд. СГИ, 1968. - №52. – С. 21 – 28.
13. Kellsall D.F.A. Study of breakage in a small continuous open-circuit wet ball mill / D.F.A. Kellsall // Canad Mining J. – 1965. - №10. – P. 25 – 29.
14. Справочник по обогащению и агломерации руд черных металлов / [Шинкоренко С.Ф., Маргулис В.С., Николаенко В.П. и др.]: под ред. С.Ф. Шинкоренко.- М.: Недра, 1964. – 527 с.

В статье приведены результаты исследования движения мелющих тел в поперечном разрезе и пульпы в поперечном разрезе и вдоль барабана. Выделена закономерность расстановки и движения шаров в поперечных разрезах, установлены смешивающие свойства шаровой мельницы.

In the article the results of research of motion of grindings bodies in a transverse section and mash are resulted in a transverse section and along a drum. Conformity to law of placing and motion of balls is selected in transverse sections, mixing up properties of ball mill are set.